Kernfotoeffekt, Photonenimpuls und Neutroneninterferenz

Aufgaben

1 Die Deutung des Fotoeffekts durch Albert Einstein im Jahr 1905 stellt einen wichtigen Schritt in der Entwicklung der Quantenphysik dar.
Beschreiben Sie, worin der Fotoeffekt besteht.
Erläutern Sie die Graphen in Material 1. Geben Sie dabei die Bedeutung der Punkte A_1 bzw. A_2 sowie B_1 bzw. B_2 und der Steigung der Graphen an.
Erläutern Sie, wie Einstein die experimentellen Beobachtungen deutete.

(9 BE)

2 Beim Kernfotoeffekt werden durch Absorption eines Photons einzelne Bestandteile (meist Neutronen, Protonen oder Alphateilchen) aus einem Atomkern gelöst. Ralf C. Mobley und Richard A. Laubenstein zerlegten im Jahr 1950 auf diese Weise Deuteriumkerne, die aus einem Proton und einem Neutron bestehen, in ihre Bestandteile und wiesen die entstehenden Neutronen nach. Dabei zeigte sich, dass unabhängig von der Photonenintensität der Kernfotoeffekt erst einsetzt, wenn die Photonenenergie mindestens gleich der Energie $E_B = 2{,}227\,\text{MeV}$ ist, mit der Neutron und Proton aneinander gebunden sind. Im Folgenden soll eine mögliche Geschwindigkeit des Deuteriumkerns sowie seiner Bestandteile vernachlässigt werden.

2.1 Bestimmen Sie mithilfe von Material 2 die Art der elektromagnetischen Strahlung, die den Kernfotoeffekt bei Deuterium auslöst.

(4 BE)

2.2 Mobley und Laubenstein berechneten mithilfe der Gleichung $m_n \cdot c^2 + m_p \cdot c^2 - E_B = m_D \cdot c^2$ (Protonenmasse $m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$, Masse des Deuteriumkerns $m_D = 3{,}344 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$) aus der Bindungsenergie E_B von Proton und Neutron die Neutronenmasse m_n mit hoher Genauigkeit.
Berechnen Sie mit der obigen Formel die Neutronenmasse.

(4 BE)

3 Ein Laserstrahl mit Photonen der Wellenlänge $\lambda = 633\,\text{nm}$ wird auf Staubkörner gerichtet. Diese sollen als Kugeln mit einem Durchmesser von $d_{\text{Staub}} = 2\,\mu\text{m}$ und einer Dichte von $\rho = 2{,}5\,\text{g/cm}^3$ modelliert werden. Es soll angenommen werden, dass die Photonen bei einem Stoß absorbiert werden und dabei ihren gesamten Impuls auf das Staubkorn übertragen.

3.1 Zeigen Sie, dass ein Staubkorn eine Masse von etwa $m = 1{,}05 \cdot 10^{-14}\,\text{kg}$ hat.

(4 BE)

3.2 Berechnen Sie unter Vernachlässigung der Luftreibung die ungefähre Anzahl n der Photonen, die ein Staubkorn treffen müssten, damit sich seine Geschwindigkeit um $500\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ändert, was etwa der Geschwindigkeit der Luftmoleküle aufgrund der Wärmebewegung entspricht.
[zur Kontrolle: $n \approx 5 \cdot 10^{15}$]

(6 BE)

3.3 Durch einen Laserstrahl ($\lambda = 633\,\text{nm}$) mit einem kreisförmigen Querschnitt (Durchmesser $d_{\text{Strahl}} = 1\,\text{mm}$) soll die Geschwindigkeit des Staubkorns innerhalb einer Sekunde um $500\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ geändert werden (Material 3). Untersuchen Sie die dazu notwendige elektrische Leistung eines Lasers mit einem Wirkungsgrad von 0,1 %.

(6 BE)

4 Neutronen haben als Quantenobjekte auch Welleneigenschaften. Material 4 zeigt das Prinzip eines Versuchsaufbaus, mit dem man einen Strahl aus Neutronen zur Interferenz bringen kann. Der Strahl aus Neutronen mit einer einheitlichen Geschwindigkeit wird in Punkt B geteilt. Der eine Teilstrahl läuft über die Strecke $s = 4\,\text{cm}$ zum Reflektor D und wird zum Punkt E in der Höhe r reflektiert. Der andere Teilstrahl überwindet zuerst die Höhe r und wird im Punkt C zum Punkt E reflektiert, wo er mit dem anderen Teilstrahl interferiert. Die Neutronen haben aufgrund ihrer unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf den Strecken $\overline{BD}$ und $\overline{CE}$ dort unterschiedliche De-Broglie-Wellenlängen λ bzw. λ'. Die Veränderung der De-Broglie-Wellenlänge auf den Strecken $\overline{BC}$ und $\overline{DE}$ führt dazu, dass die beiden Teilstrahlen in Punkt E wieder mit gleicher Wellenlänge ankommen. In Abhängigkeit von der Höhe r ergeben sich in Punkt F verschiedene Intensitäten für den Neutronenstrahl.

4.1 Berechnen Sie die Geschwindigkeit v eines Neutrons mit einer De-Broglie-Wellenlänge von $\lambda = 26{,}6\,\text{pm}$.

(3 BE)

4.2 Erklären Sie zunächst, was man mit den Termen $\frac{s}{\lambda}$ und $\frac{s}{\lambda'}$ berechnet.

Erklären Sie auf Basis dieser Information, dass man immer dann ein Maximum der Zählrate erhält, wenn $\frac{s}{\lambda} - \frac{s}{\lambda'} = k$ mit ganzzahligem k gilt.

Erläutern Sie schließlich die Herleitung der Formel für die potenzielle Energie eines Neutrons in der Höhe r für $k = 1$ in Material 5 unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die De-Broglie-Wellenlänge der Neutronen sehr klein ist im Vergleich zu den Abmessungen des Versuchsaufbaus.

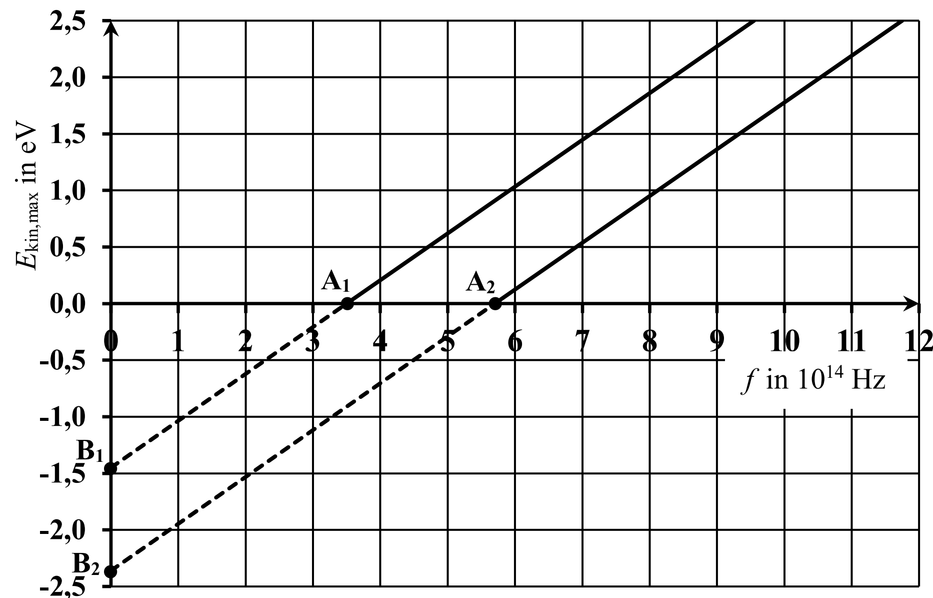
(10 BE)

4.3 Für eine Höhe von $r = 1{,}5\,\text{cm}$ erhält man ein erstes Intensitätsmaximum. Berechnen Sie mithilfe der Formel in Material 5 die De-Broglie-Wellenlänge der einlaufenden Neutronen.

(4 BE)

Material 1

Maximale kinetische Energie der Fotoelektronen als Funktion der Frequenz der Strahlung



Material 2

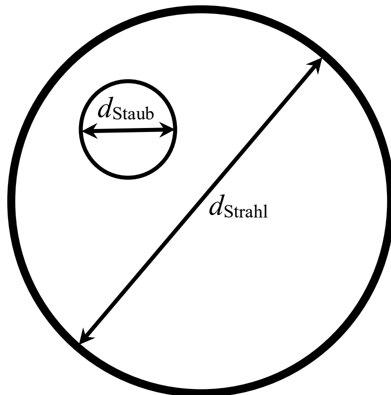
Spektralbereiche elektromagnetischer Wellen (Auswahl)

Art der Wellen	**Wellenlängenbereich**
Langwelle	10 km – 1 km
Mittelwelle	1 km – 100 m
Kurzwelle	100 m – 10 m
Ultrakurzwelle	10 m – 1 m
Mikrowelle	1 m – 1 mm
Terahertzstrahlung	3 mm – 30 µm
Infrarot	1 mm – 780 nm
sichtbares Licht	780 nm – 380 nm
Ultraviolett	380 nm – 10 nm
Röntgenstrahlung	10 nm – 10 pm
Gammastrahlung	< 10 pm

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum (abgerufen am 27.01.2023).

Material 3

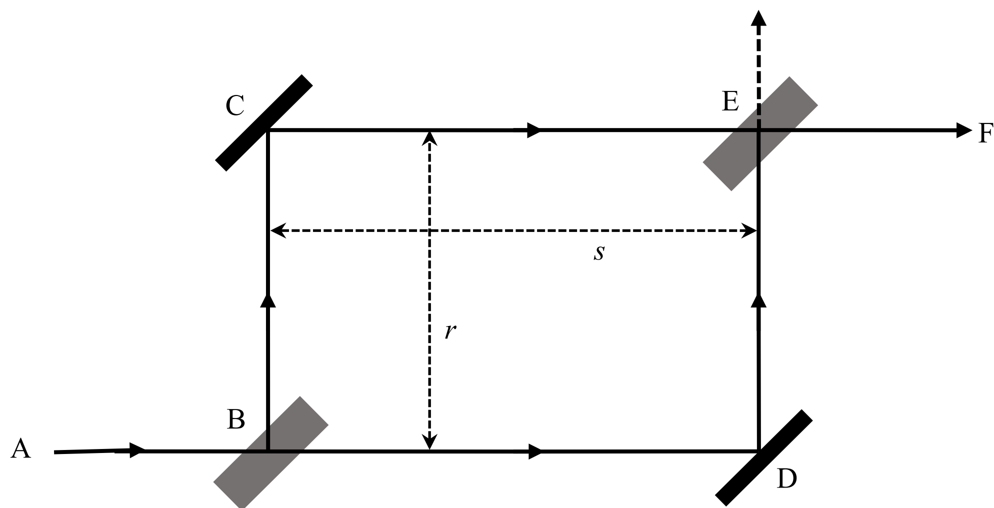
Staubkorn und Laserstrahl (schematisch)



Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu.

Material 4

Versuchsaufbau zur Interferenz von Neutronen



Der Versuchsaufbau ist vertikal im Schwerefeld der Erde angeordnet.

Material 5

Herleitung der Formel für die potenzielle Energie eines Neutrons

(1) $E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}} - E'_{\text{kin}}$

(2) $= \frac{m_{\text{n}}}{2}\left(v^2 - v'^2\right)$

(3) $= \frac{m_{\text{n}}}{2}\left(\frac{h^2}{m_{\text{n}}^2 \cdot \lambda^2} - \frac{h^2}{m_{\text{n}}^2 \cdot \lambda'^2}\right)$

(4) $= \frac{h^2}{2m_{\text{n}} \cdot s^2}\left(\frac{s^2}{\lambda^2} - \frac{s^2}{\lambda'^2}\right)$

(5) $= \frac{h^2}{2m_{\text{n}} \cdot s^2}\left(\frac{s^2}{\lambda^2} - \left(\frac{s}{\lambda} - 1\right)^2\right)$

(6) $= \frac{h^2}{2m_{\text{n}} \cdot s^2}\left(2\frac{s}{\lambda} - 1\right)$

(7) $\approx \frac{h^2}{m_{\text{n}} \cdot s \cdot \lambda}$